

## Réponse agile d'une ligne métamatériau composite par l'utilisation d'un substrat de type YIG

Aziza Zermane<sup>1,2</sup>, Bruno Sauviac<sup>1</sup>, Béatrice Payet-Gervy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lyon, F-69000, Lyon, France

Université de Saint Etienne, F-42000, Saint-Etienne, France

Télécom Saint-Etienne, école associée de l'institut Mines Télécom

Laboratoire LT2C (Laboratoire Telecom Claude Chappe)

<sup>2</sup>Université Mentouri de Constantine, A-25000 Constantine, Algérie

Laboratoire LHS (Laboratoire des Hyperfréquences et Semi-conducteurs)

### Résumé

*Ce papier se propose d'étudier le concept de lignes artificielles associées à un matériau de type ferrite. L'ingénierie de type métamatériau permet la création de structures de propagation ayant des propriétés spécifiées à l'avance. L'ajout d'une dimension de type matériau dispersif permet à la fois d'augmenter le nombre de paramètres de réglage mais rend également possible la reconfiguration dynamique des propriétés de propagation par une commande externe. L'étude propose la réalisation d'une ligne composite coplanaire d'abord sur substrat diélectrique pour montrer les effets de type main gauche puis une réalisation sur ferrite pour laquelle les effets combinés de type métamatériau et de type ferrite sont mis en évidence expérimentalement. L'augmentation du nombre de bandes de propagation ainsi que leur déplacement sur le spectre sont mis en évidence. La structure permet de faire apparaître 2 bandes main gauches séparées.*

### 1. Introduction

Le principe des lignes artificielles consiste à mettre en cascade des cellules élémentaires afin d'obtenir la propagation électromagnétique souhaitée. Suite à l'engouement pour les métamatériaux, différentes propositions ont émergé dans la littérature et ont conduit à la notion ligne composite main droite main gauche (CRLH) [1,2]. La notation CRLH est maintenant la désignation usuelle de ces lignes artificielles puisque le nom décrit clairement la nature différente de la propagation selon les bandes de fréquence (propagation main droite puis main gauche)

L'utilisation de ce concept dans la réalisation de lignes et de composants à base de ligne a montré tout l'intérêt de cette approche. De nombreux auteurs se sont ensuite penchés sur la possibilité de rendre ces structures agiles en fréquence. Plusieurs approches ont été proposées : en utilisant une commande de type mécanique de type MEMS [3], à l'aide d'éléments actifs [4], par l'intermédiaire d'un film ferroélectrique [5]. Dans ce document, nous proposons d'utiliser un matériau

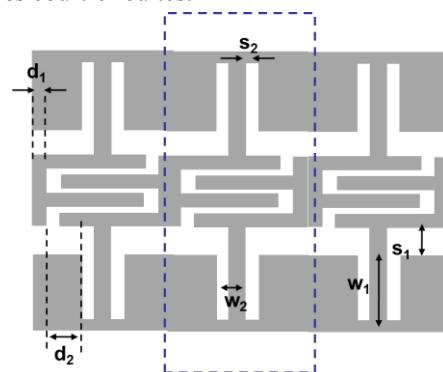
de type magnétique pour rajouter de l'agilité à une ligne de propagation métamatériau.

Nous présenterons d'abord la structure développée et réalisée dans sa forme diélectrique afin de mettre en évidence les phénomènes de propagation particuliers. Ensuite nous poursuivrons par la réalisation d'une ligne sur substrat ferrite qui sera mesurée sous différents champ d'aimantation statique pour faire apparaître les différents états de propagation selon les bandes de fréquences et la valeur du champ extérieur appliqué.

### 2. Structure de la ligne artificielle

#### 2.a. Cellule élémentaire

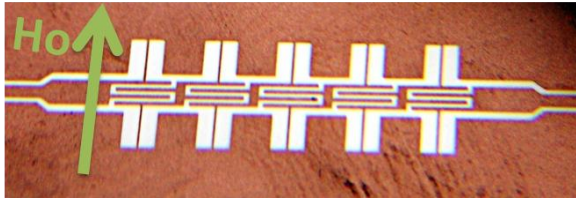
La structure est réalisée en technologie coplanaire. La cellule de base qui servira à la création de la ligne CRLH est présentée sur la figure 1. Elle est composée d'une capacité inter-digitée coplanaire mise en série et de stubs parallèles court-circuités.



**Figure 1.** Schématisation de la structure. La cellule unitaire est repérée par le cadre pointillé.  $W1=1.4\text{mm}$ ,  $W2=0.1\text{mm}$ ,  $S1=0.4\text{mm}$ ,  $S2=0.65\text{mm}$ ,  $d1=0.2\text{mm}$ ,  $d2=0.65\text{mm}$

#### 2.b. Ligne artificielle

La ligne complète est présentée sur la figure 2. Elle est constituée de 5 cellules en cascade terminée par un taper pour assurer la transition d'impédance caractéristique à  $50\Omega$ .

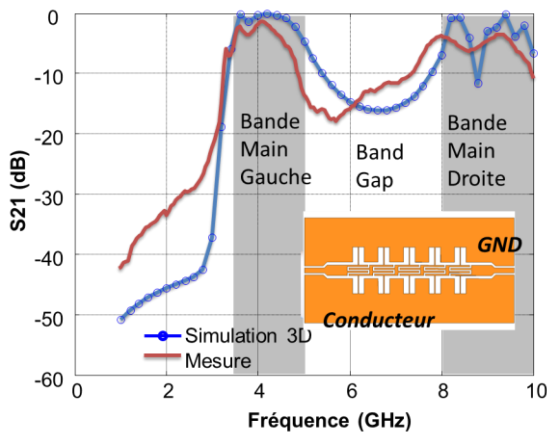


**Figure 2.** Photographie de la ligne réalisée. Vue de dessus. Zones blanches : fentes. Zones colorées : métal. Pour les cas avec ferrite l'orientation du champ appliqué matérialisée par la flèche.

### 3. Résultats

#### 3.a. Structure sur alumine

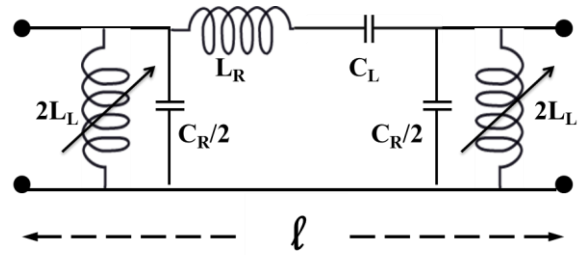
Les mesures ont été réalisées sur les différents dispositifs. La figure 3 présente les résultats de transmission de la ligne sur substrat diélectrique. On peut y repérer aisément la bande de propagation main gauche et la bande de propagation main droite. La ligne étant non équilibrée, les deux bandes sont séparées par un band gap. L'ensemble est conforme au comportement prévu dans la littérature [6].



**Figure 3.** Mesure de la ligne sur substrat alumine.

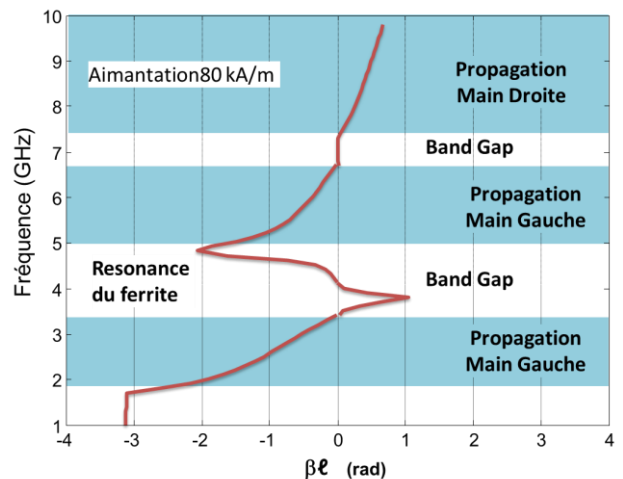
#### 3.b. Structure sur ferrite

Une structure identique a été réalisée sur substrat ferrite de type YIG. Selon l'aimantation appliquée au substrat, la fréquence de gyrorésonance du ferrite se déplace en fréquence. Ceci permet d'obtenir un modèle électrique équivalent de la cellule unitaire (figure 4) dans lequel l'inductance localisée en parallèle est rendu variable par l'application d'une aimantation externe.



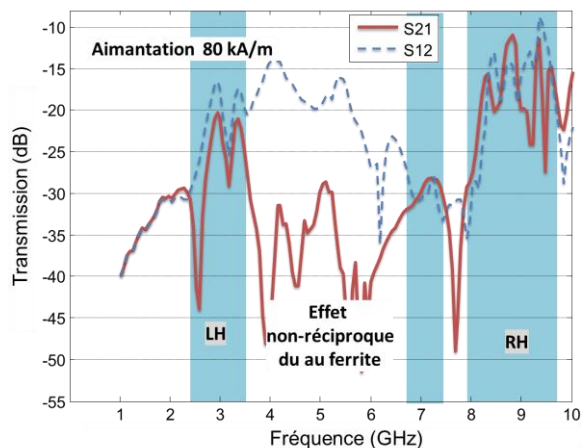
**Figure 4.** Modèle électrique équivalent de la cellule de base sur substrat magnétique

Cette variation va avoir pour conséquence le déplacement des bandes de propagation qui vont se « mélanger » à la réponse propre du matériau magnétique pour créer une alternance nouvelle de bandes. La prévision théorique du diagramme de dispersion est présentée sur la figure 5, pour une aimantation de 80kA/m. A basses fréquence on peut ainsi repérer la bande main gauche attendue sur cette ligne métamatériau. Dans cet état d'aimantation, la fréquence de résonance du matériau se situe au milieu de la bande main gauche. Autour de cette fréquence de résonance, la perméabilité du matériau devient négative et la propagation s'en trouve stoppée, ce qui crée un band gap. La bande main gauche se trouve donc divisée en deux, et l'on voit ensuite réapparaître plus loin la bande main gauche, lorsque la résonance magnétique est dépassée. Après la bande main gauche on remarque ensuite le band gap, car la ligne est toujours déséquilibrée puis au final la bande de propagation main droite.



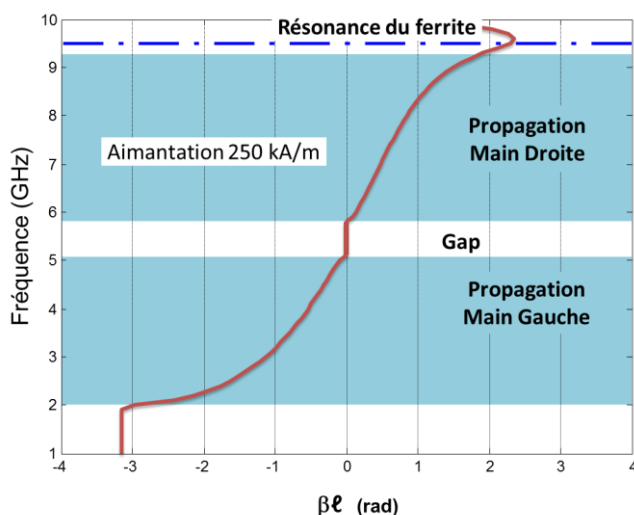
**Figure 5.** Illustration des différentes bandes de propagation.

La ligne a été réalisée et les résultats sont présentés sur la figure 6. On y distingue la succession des différentes bandes. Outre ces effets, autour de la fréquence de résonance, le milieu devient fortement anisotrope et surtout non réciproque. Cette non-réciprocité est clairement visible dans le band gap où l'écart se creuse fortement entre le paramètre S21 et le paramètre S12.



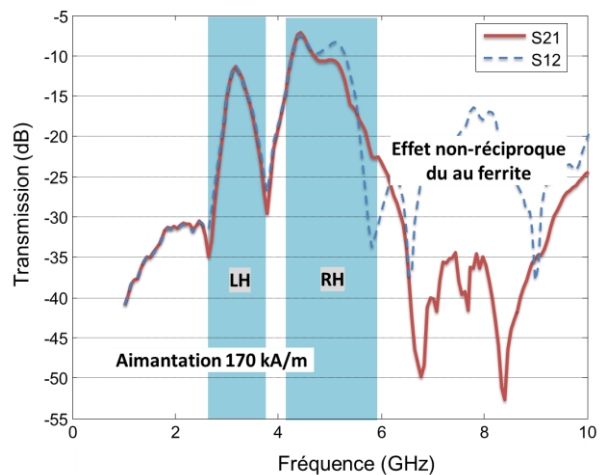
**Figure 6. Mesure de la ligne sous champ magnétique.**

Lorsque l'intensité du champ statique appliqué augmente la résonance magnétique se déplace en fréquence ; plus cette intensité est grande, plus la fréquence de résonance gyromagnétique se déplace vers les hautes fréquences. Sur la figure 7, est tracé le diagramme de dispersion lorsque l'aimantation est beaucoup plus importante que dans le premier cas. Dans cette nouvelle situation, la fréquence de résonance gyromagnétique apparaît au milieu de la bande de propagation main droite. On a alors une succession de bandes : main gauche, band gap, main droite, band gap magnétique puis de nouveau, bande main droite.



**Figure 7. Illustration des positionnements des bandes sous forte aimantation.**

Les mesures sont présentées sur la figure 8 et elles confirment l'agilité de la dispersion commandée par le l'aimantation. On note bien au passage le phénomène lié à la résonance magnétique autour de 8 GHz avec de forts effets non-réciproques.



**Figure 8. Mesure de la ligne sous fort champ magnétique d'aimantation.**

La création d'agilité fréquentielle dans la réponse d'une ligné métamatériau est donc possible. On pourra toutefois noter encore des problèmes au niveau des performances mesurées. Les pertes d'insertion dans les bandes de propagation sont en effet relativement élevées. Ceci s'explique par plusieurs effets. D'abord par le fait que la ligne n'est pas équilibrée et que son impédance d'entrée est alors dispersive. Ensuite les pertes magnétiques jouent un rôle important sur le niveau transmis.

#### 4. Conclusion

Plusieurs travaux dans la littérature se sont penchés sur l'agilité en fréquence des lignes artificielles. Dans cet article, nous proposons l'utilisation d'un matériau ferrite afin de disposer d'un moyen de déplacer les bandes de propagation par une commande extérieure. Cette approche permet notamment de faire apparaître 2 bandes main gauches séparées.

Les perspectives de ce travail s'inscrivent dans la recherche de la diminution des pertes magnétiques, et dans l'analyse plus fine de l'évolution des impédances pour la maîtrise de l'adaptation.

#### 5. Bibliographie

- [1] C. CALOZ and T. ITOH, "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line," in *Proc. IEEE-AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vol. 2, San Antonio, June 2002, pp. 412–415.
- [2] G.V. ELEFThERIADES, A.K. IYER, and P. C. KREMER, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines", *IEEE. Trans. Microw. Theory Tech*, Vol. 50, pp 2702–2712, 2002.

- [3] J. PERRUISSEAU-CARRIER, T. Lisecand A.K. Skrivervik, "Circuit model and design of silicon-integrated CRLH-TLS analogically controlled by MEMS", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 48: 2496–2499, 2006.
- [4] A. VÉLEZ, J. BONACHE, F. MARTÍN, "Varactor-Loaded Complementary Split Ring Resonators (VLCSRR) and Their Application to Tunable Metamaterial Transmission Lines," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* , vol.18, no.1, pp.28-30, Jan. 2008
- [5] G. HOUZET, X. MÉLIQUE, D. LIPPENS, L. BURGNIES, G. VELU, and J.-C. CARRU, "Microstrip Transmission Line Loaded by Split-Ring Resonators Tuned by Ferroelectric Thin Film", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 12, 225-236, 2010.
- [6] C. CALOZ, T. ITOH, « Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications: The Engineering Approach», ISBN: 9780471669852, Wiley 2006